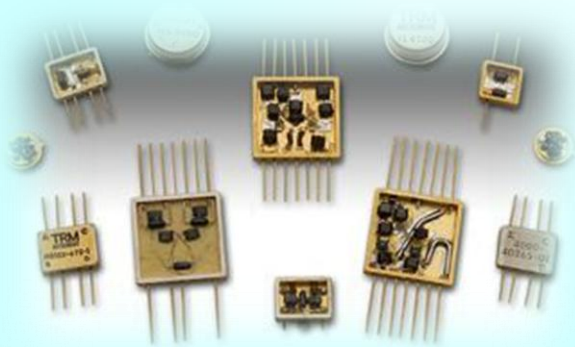
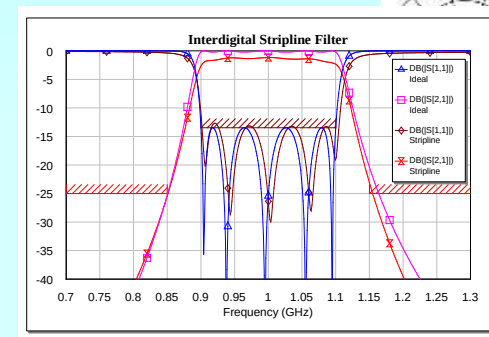
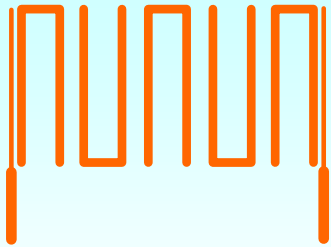


# Микроталасна пасивна кола



Милка Потребић  
Дејан Тошић



# Микроталасни филтри

## — део 2 —

*филтар са паралелно спрегнутим полуталасним резонаторима,  
интердигитални филтар,  
чешљасти филтар*

Уводник

Резонатор 1

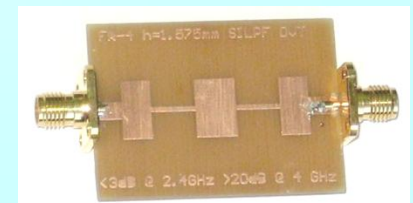
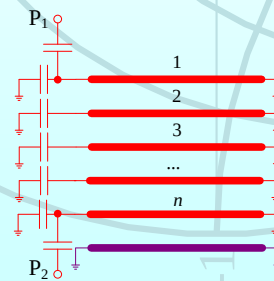
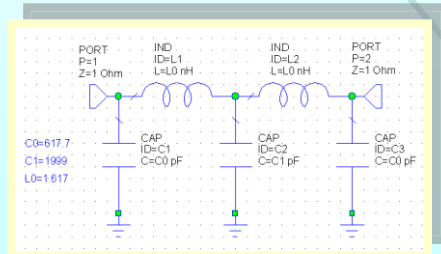
Резонатор 2

Резонатор 3

Резонатор 4

Резонатор 5

Уводник



# Филтри пропусници опсега (ВР) са спрегнутим водовима



- Спрегнути водови - вишепроводнички вод
- Реализација филтара са спрегнутим резонаторима
- Резонатори су реализовани од одсечака водова и концентрисаних компоненти
- Могуће реализације:
  1. Филтар са паралелно спрегнутим полуталасним резонаторима ( $\lambda/2$  резонатори)
  2. Интердигитални филтар ( $\lambda/4$  резонатори)
  3. Чешљасти филтар (садржи и концентрисане компоненте)

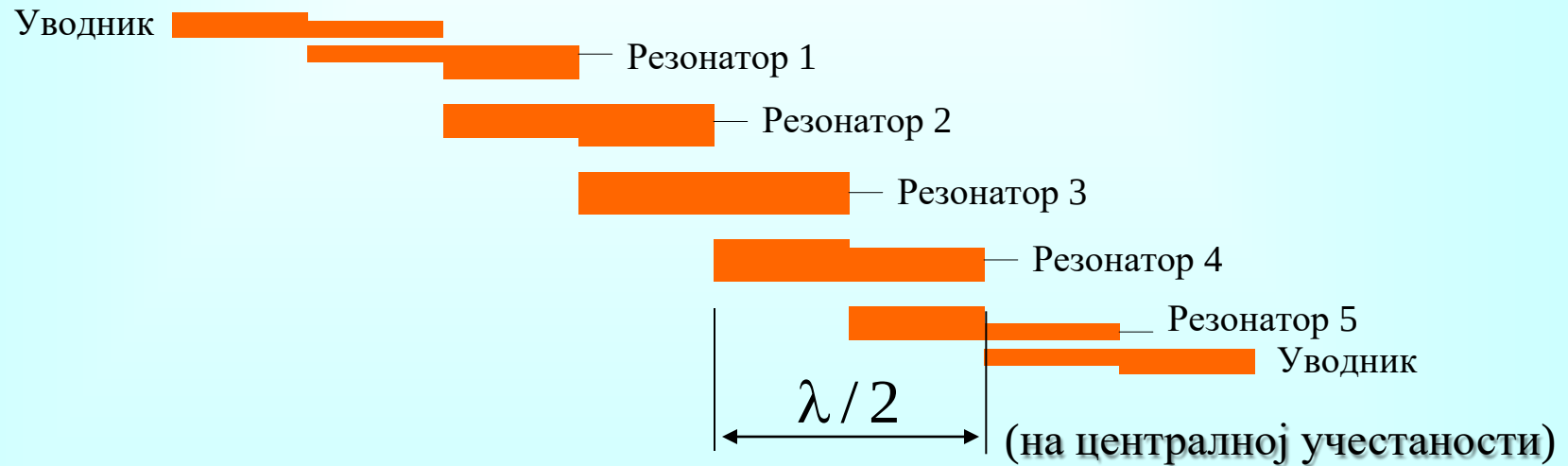


# Филтри са спрегнутим водовима...

- Резонантне учестаности су исте или блиске
- Реализација у техници тракастих и микротракастих водова
- Полиномски филтри (Бат., Чеб., Бес.)
- Пројектовање започиње одређивањем LP прототипа
- Узима се у обзир нехомогеност диелектрика и губици
- На почетку пројектовања занемарују се ефекти дисконтинуитета и дисперзија

# 1. Филтар са паралелно спрегнутим полуталасним резонаторима

- Реализација у техници тракастих или микротракастих водова:

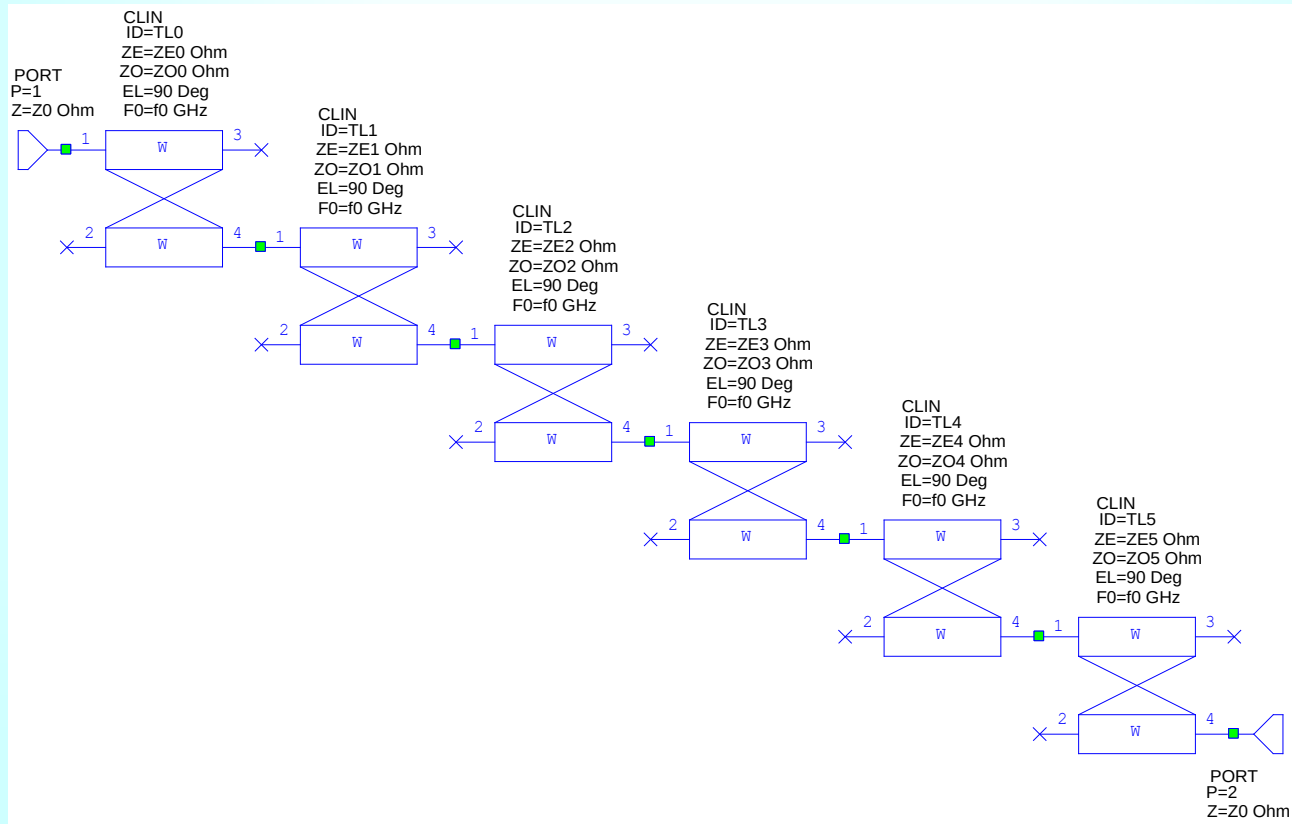


- Каскада  $\lambda/4$  спрегнутих симетричних секција
- Практичан ред филтра = броју резонатора



# Филтар са паралелно спрегнутим полуталасним резонаторима...

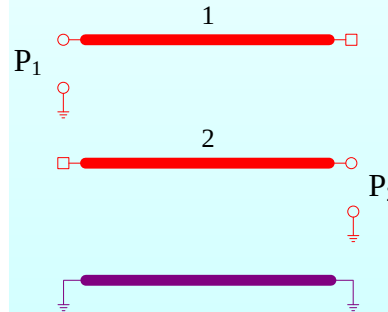
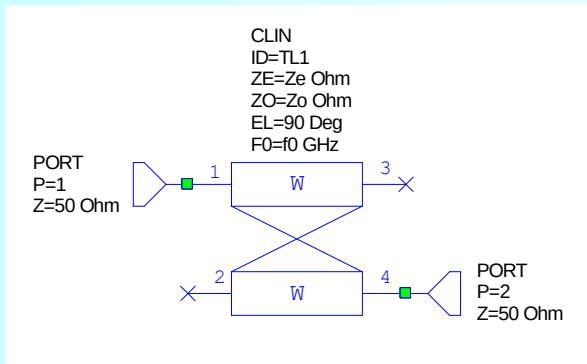
Еквивалентна шема са спрегнутим водовима



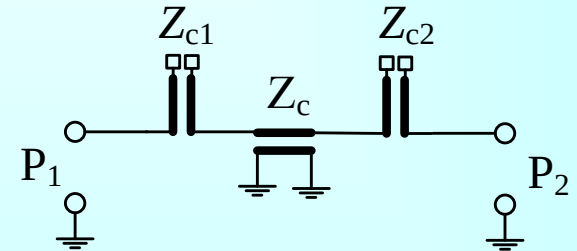


# Филтар са паралелно спрегнутим полуталасним резонаторима...

Еквивалентна шема са секцијама и огранцима обичних водова (поглавље 3 – вишепроводнички водови):



≡



$$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_0$$

$$Z_c = (Z_e - Z_0) / 2$$

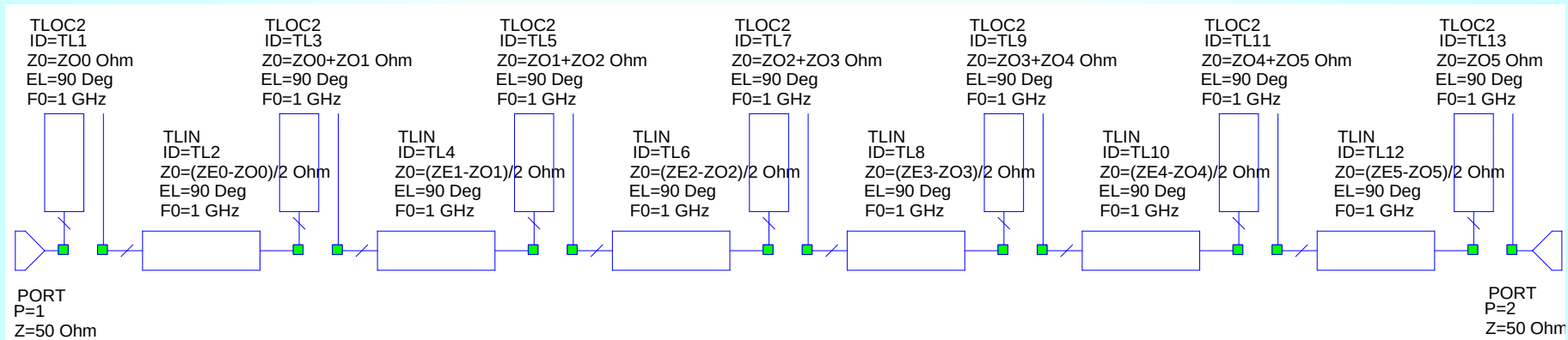
$$d = \lambda / 4, f_0$$

Ово је ВР филтар врло мале селективности



# Филтар са паралелно спрегнутим полуталасним резонаторима...

- Еквивалентна шема са секцијама и огранцима обичних водова

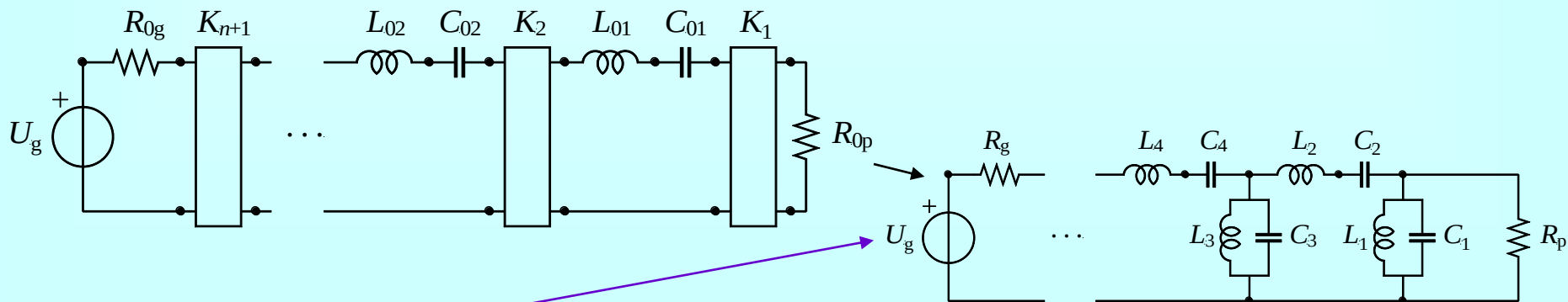
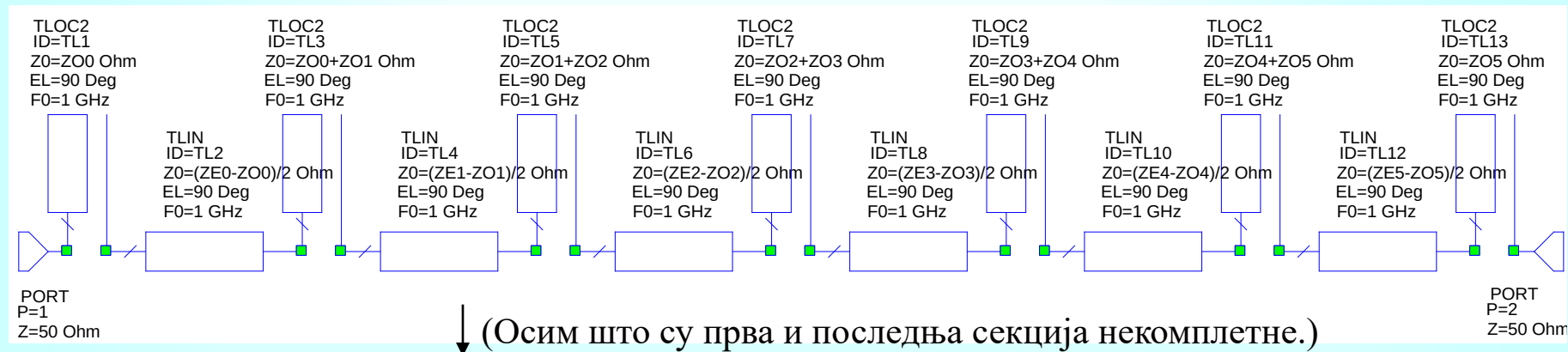


- Парови редних огранака су еквивалентирани са једним огранком  $Z_{ul} = -j(Z_{c1} + Z_{c2})\text{ctg } \theta$
- $n + 2$  резонатора и  $n + 1$  инвертор - филтар са спрегнутим резонаторима, са осц. колима само у редним гранама



# Филтар са паралелно спрегнутим полуталасним резонаторима...

Филтар са спрегнутим резонаторима, са осц. колима само у редним гранама

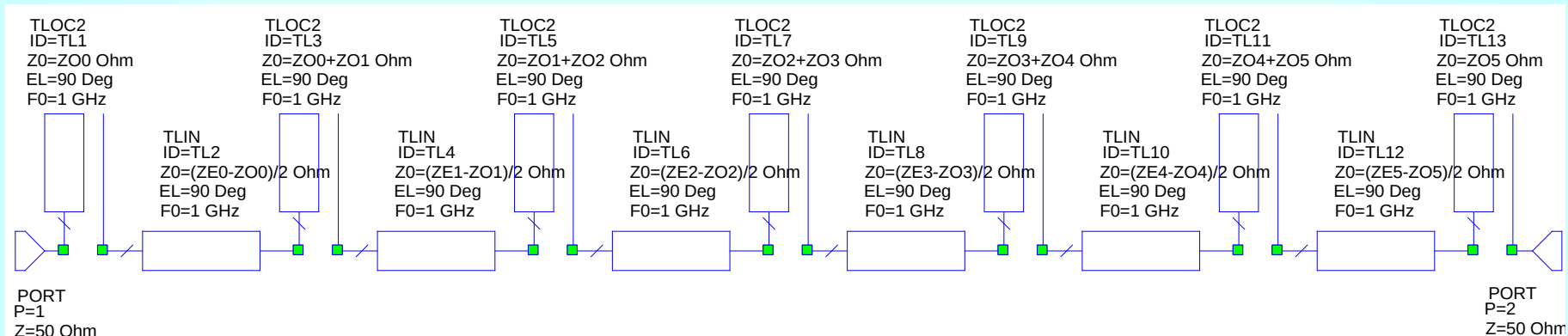


Тако стижемо до LC (BP и LP) прототипа



# Филтар са паралелно спрегнутим полуталасним резонаторима...

- **Ред филтра** теоријски је једнак броју резонатора али  $= n + 2 = 7$
- Прва и последња секција су мало селективне, па је **практичан ред филтра**  $= n = 5$
- Прва и последња секција имају улогу трансформатора импедансе на  $Z_0$





# Синтеза филтра са паралелно спрегнутим $\lambda/2$ резонаторима

- Основни задатак је одређивање парне и непарне импедансе секција
- Задато је:
  - Тип филтра (Бат, Чеб,...)
  - Номинална импеданса  $Z_0$
  - Пропусни опсег  $(\omega_1, \omega_2)$
  - Таласност (код Чеб-а) или  $A_p$  (код Бат-а)
  - Стрмина преносне карактеристике (одређује ред филтра,  $n$ )



# Синтеза филтра са паралелно спрегнутим $\lambda/2$ резонаторима ...

- Потребно је да знамо или да одредимо и коефицијенте  $g_i, i = 1, \dots, n$
- Можемо искористити MWO Filter Synthesis Wizard!
- Треба унети  $n, f = 1/(2\pi) \approx 0.159$ , таласност,  $R_g = R_p = 1\Omega$
- Добијене вредности за  $L$  и  $C$  су, респективно,  $g_i, i = 1, \dots, n$
- Јединице могу бити (Hz, H, F) или (GHz, nH, nF)



# Синтеза филтра са паралелно спрегнутим $\lambda/2$ резонаторима ...

- **Прорачун:** релативна ширина проп. опсега, нормализоване каракт. импедансе инвертора, парне и непарне каракт. импедансе секција

$$\frac{K_{i,i+1}}{Z_0} = \begin{cases} \frac{\sqrt{\frac{\pi b}{2}}}{\sqrt{g_0 g_1}}, i = 0 \\ \frac{\frac{\pi b}{2}}{\sqrt{g_i g_{i+1}}}, i = 1, \dots, n-1 \\ \frac{\sqrt{\frac{\pi b}{2}}}{\sqrt{g_n g_{n+1}}}, i = n. \end{cases}$$

$$b = (\omega_2 - \omega_1) / \omega_0 \quad \omega_0 = (\omega_2 + \omega_1) / 2$$

$$Z_{e i, i+1} = Z_0 \left( 1 + \frac{K_{i, i+1}}{Z_0} + \left( \frac{K_{i, i+1}}{Z_0} \right)^2 \right), i = 0, \dots, n$$

$$Z_{o i, i+1} = Z_0 \left( 1 - \frac{K_{i, i+1}}{Z_0} + \left( \frac{K_{i, i+1}}{Z_0} \right)^2 \right), i = 0, \dots, n$$



# Синтеза филтра са паралелно спрегнутим $\lambda/2$ резонаторима ...

- **Пример:** Израчунати парне и непарне импедансе секција за Чебишевљев филтар  
 $n = 5$ ,  $f_1 = 0,95 \text{ GHz}$ ,  $f_2 = 1,05 \text{ GHz}$ ,  $A_\varepsilon = 0,1 \text{ dB}$ ,  $Z_0 = 50 \Omega$
- Резултат - филтар са идеалним водовима:

| $i$ | $g_i$  | $K_{i,i+1} / Z_0$ | $Z_{e,i+1} [\Omega]$ | $Z_{o,i+1} [\Omega]$ |
|-----|--------|-------------------|----------------------|----------------------|
| 0   | 1      | 0,3701            | 75,4                 | 38,3                 |
| 1   | 1,1468 | 0,1253            | 57,0                 | 44,5                 |
| 2   | 1,3712 | 0,0954            | 55,2                 | 45,7                 |
| 3   | 1,9750 | 0,0954            | 55,2                 | 45,7                 |
| 4   | 1,3712 | 0,1253            | 57,0                 | 44,5                 |
| 5   | 1,1468 | 0,3701            | 75,4                 | 38,3                 |
| 6   | 1      |                   |                      |                      |

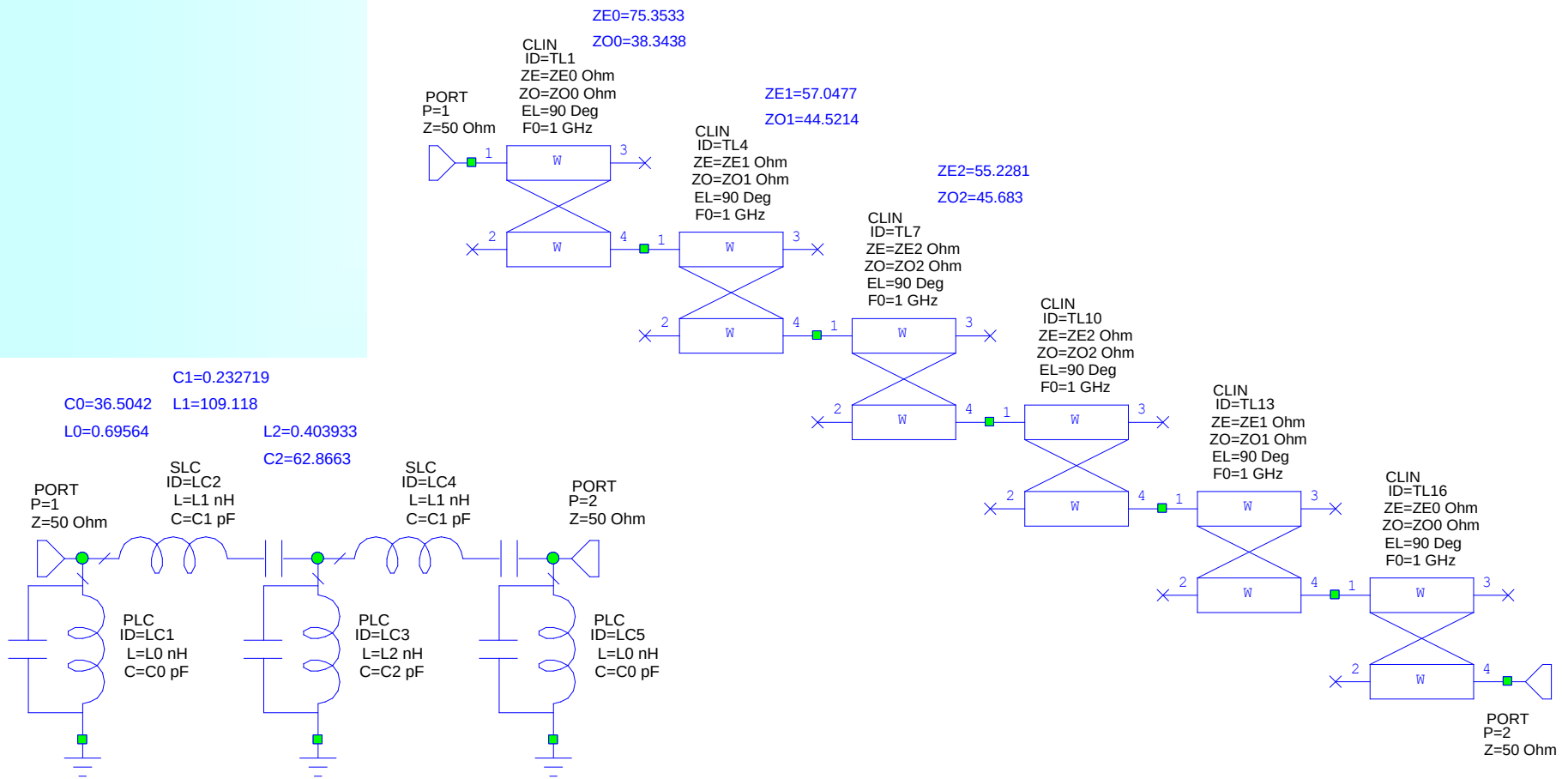


# Синтеза филтра са паралелно спрегнутим $\lambda/2$ резонаторима ...

- За исти пример:
- У MWO Filt. Wiz. реализовати
  1. LC филтар
  2. филтар паралелно спрегнутим  $\lambda/2$  резонаторима
- Проверити добијено решење
- Размотрити остварљивост једног и другог дизајна

# Синтеза филтра са паралелно спрегнутим $\lambda/2$ резонаторима ...

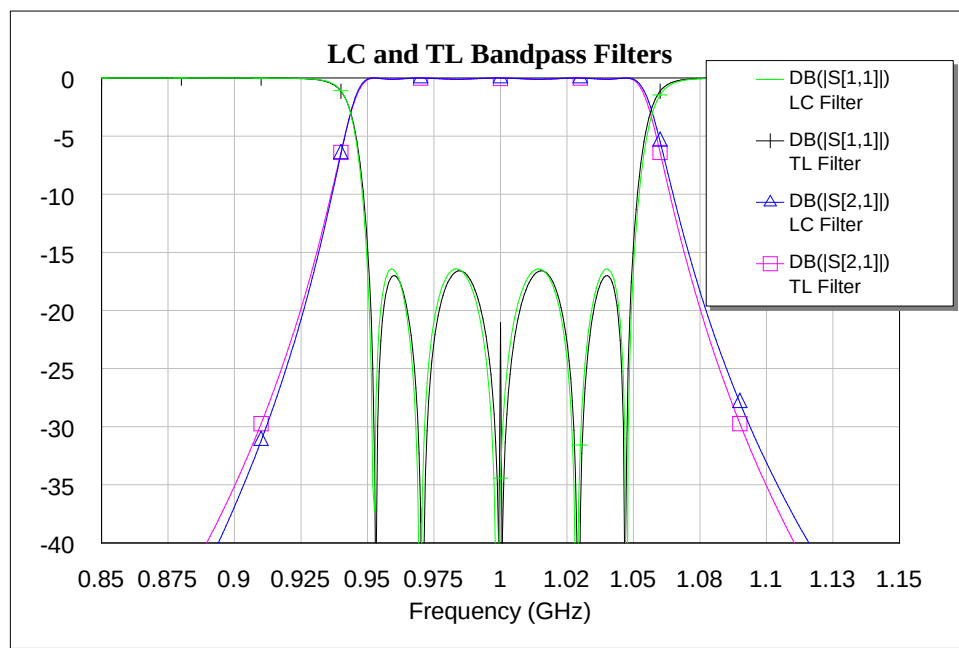
1. LC филтар
2. Филтар паралелно спрегнутим  $\lambda/2$  резонаторима



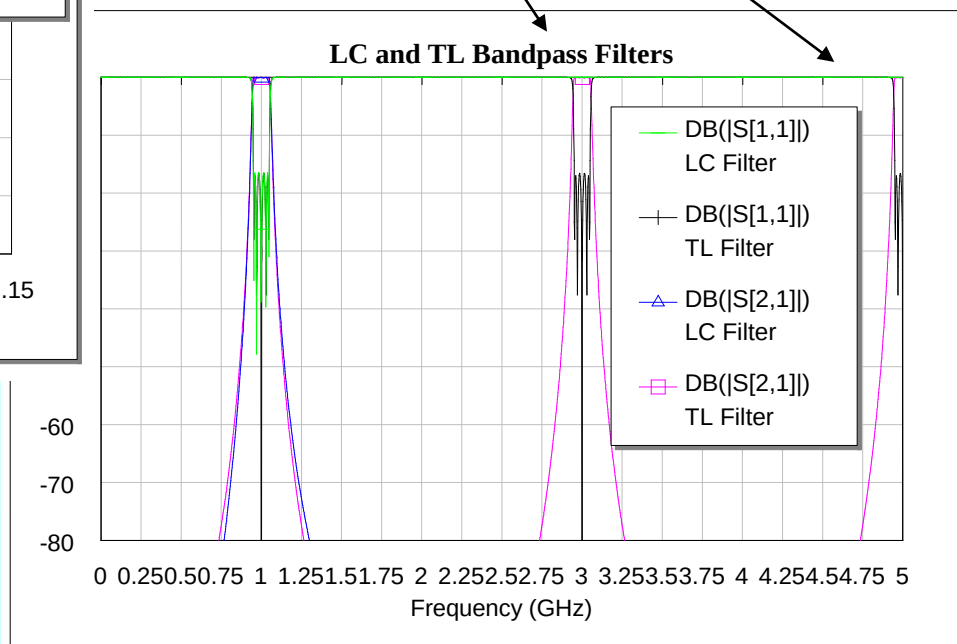


# Синтеза филтра са паралелно спрегнутим $\lambda/2$ резонаторима ...

S-параметри филтра са идеалним водовима



Паразитни пропусни опсези су  
на непарним умношцима  
основног опсега





# Синтеза филтра са паралелно спрегнутим $\lambda/2$ резонаторима ...

- Реализација у конкретној техници (микротракасти, тракасти,...)
- Ако је диелектрик нехомоген (микрострип) за одређивање  $\lambda$  узима се средња вредност (геометријска) пермитивности парног и непарног мода
- **Пример реализације у техници тракастих водова:**
  - Подлога од тефлона:  $h_1 = h_2 = 1,575 \text{ mm} = 62 \text{ mil}$ ,  
 $\epsilon_r = 2,33, \text{tg } \delta = 0,0002, t = 18 \text{ }\mu\text{m}$

# Синтеза филтра са паралелно спрегнутим $\lambda/2$ резонаторима ...



Пример реализације у техници тракастих водова...

Резултат:

- Варирањем ширина трака ( $w$ ) и процепа ( $s$ ) треба добити претходно израчунате импедансе
- Калкулатор импеданси (Linpar, TXLine), номограми, аналитички изрази из књиге,...
- Linpar

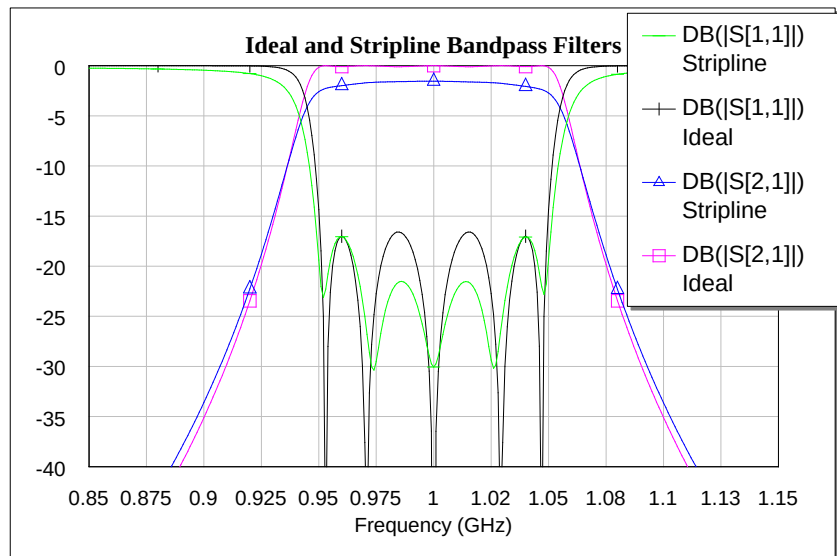
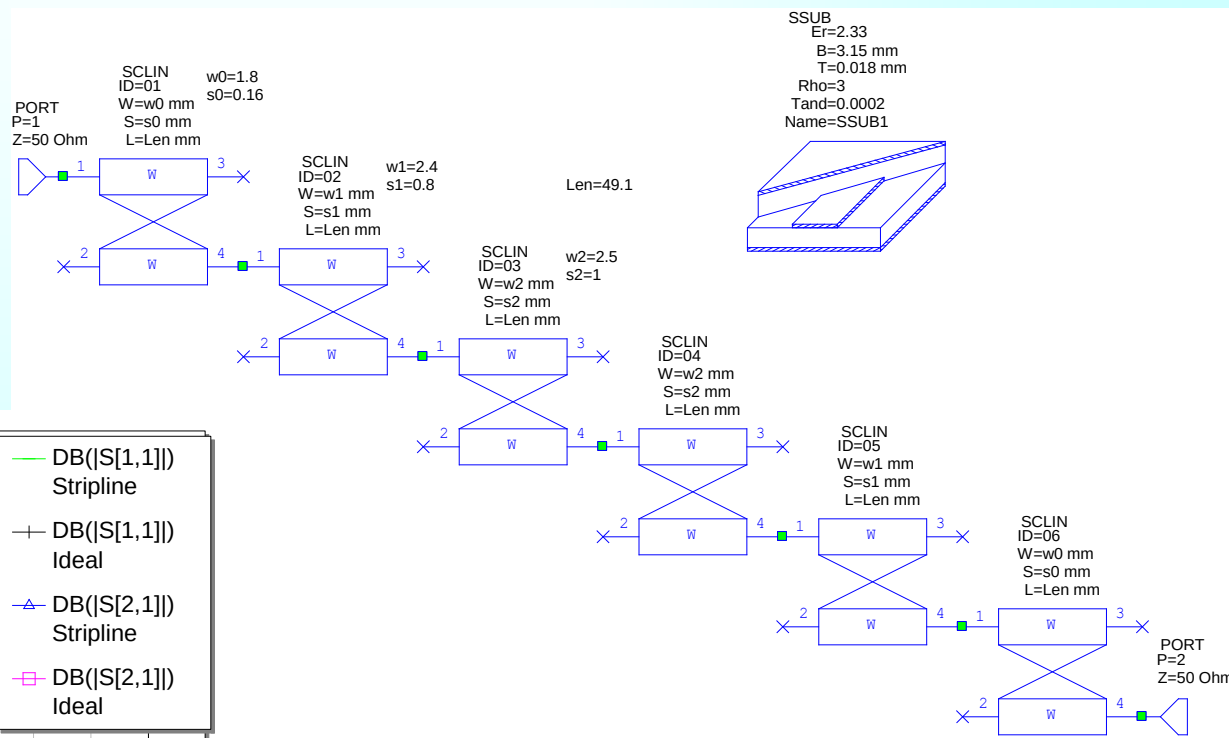
$$Z_{e i, i+1}, Z_{o i, i+1}$$

$$w_{\text{uvodnika}} = 2,5 \text{ mm} \quad d = 49,1 \text{ mm}$$

| $i$  | $Z_{e i, i+1} [\Omega]$ | $Z_{o i, i+1} [\Omega]$ | $w [\text{mm}]$ | $s [\text{mm}]$ |
|------|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| 0, 5 | 75,4                    | 38,3                    | 1,8             | 0,16            |
| 1, 4 | 57,0                    | 44,5                    | 2,4             | 0,8             |
| 2, 3 | 55,2                    | 45,7                    | 2,5             | 1,0             |

# Синтеза филтра са паралелно спрегнутим $\lambda/2$ резонаторима ....

Резултат реализације у техници тракастих водова:





# Синтеза филтра са паралелно спрегнутим $\lambda/2$ резонаторима ...

Пример реализације у техници микротракастих водова:

– Подлога од FR-4:

$$h_1 = 1,575 \text{ mm} = 62 \text{ mil}$$

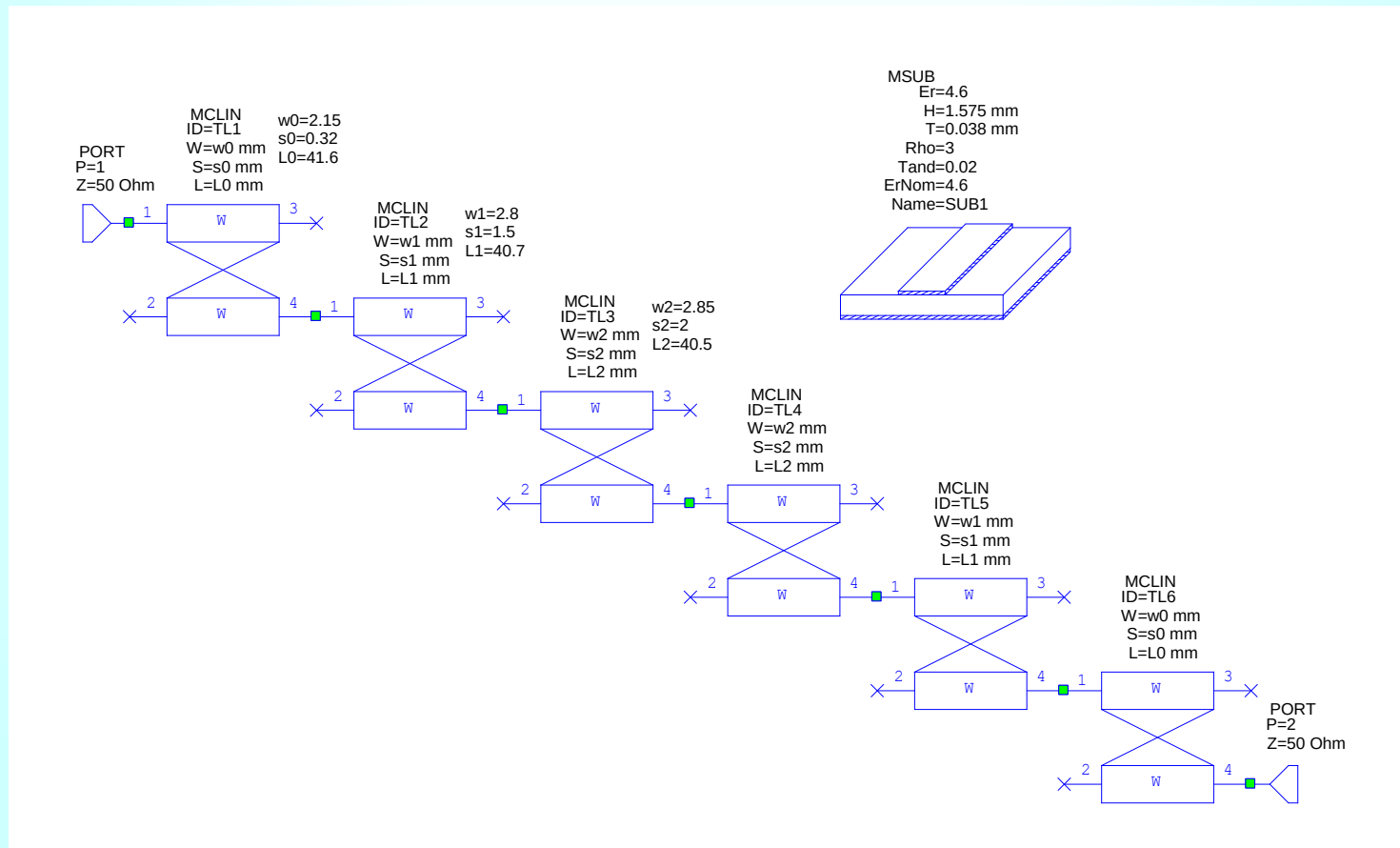
– Linpar

$$\epsilon_r = 4,6, \text{ tg } \delta = 0,02, t = 36 \text{ } \mu\text{m}$$

| $i$  | $Z_{e i, i+1} [\Omega]$ | $Z_{o i, i+1} [\Omega]$ | $w [\text{mm}]$ | $s [\text{mm}]$ | $\epsilon_{\text{ree}}$ | $\epsilon_{\text{reo}}$ | $D [\text{mm}]$ |
|------|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|
| 0, 5 | 75,4                    | 38,3                    | 2,15            | 0,32            | 3,631                   | 2,916                   | 41,6            |
| 1, 4 | 57,0                    | 44,5                    | 2,8             | 1,5             | 3,726                   | 3,109                   | 40,7            |
| 2, 3 | 55,2                    | 45,7                    | 2,85            | 2               | 3,716                   | 3,155                   | 40,5            |

# Синтеза филтра са паралелно спрегнутим $\lambda/2$ резонаторима ...

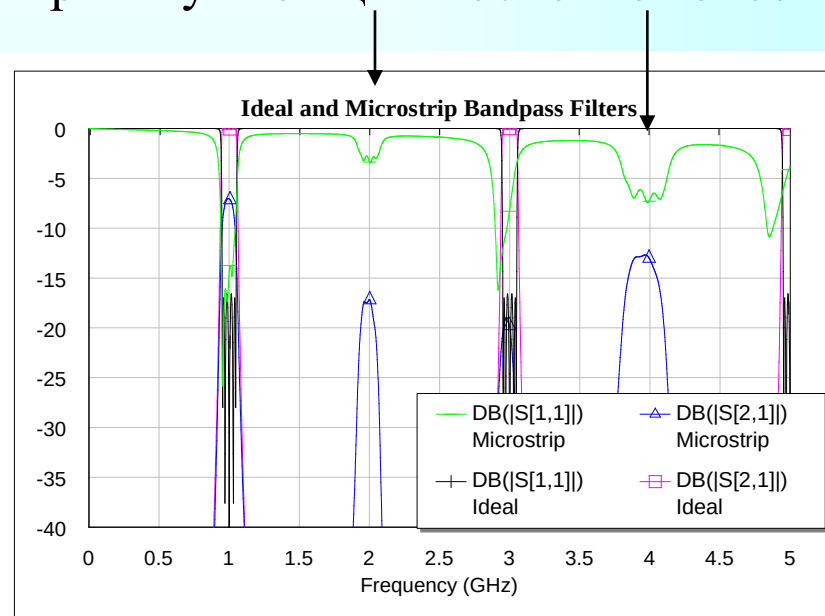
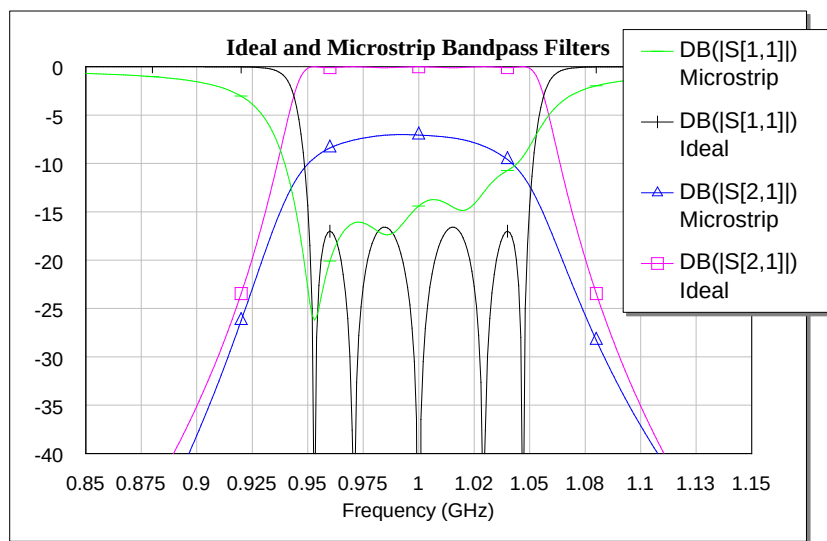
Резултат реализације у техници микротракастих водова:



# Синтеза филтра са паралелно спрегнутим $\lambda/2$ резонаторима ...

Резултат реализације у техници микротракастих водова:

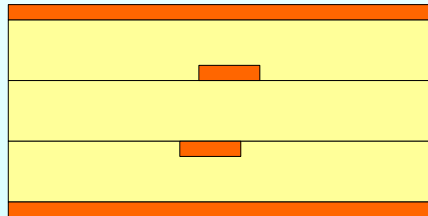
Паразитни пропусни опсези се појављују и на парним умношцима основног опсега



# Даљи захтеви филтра са паралелно спрегнутим $\lambda/2$ резонаторима ....



- За пропусне опсеге шире од 10% потребне су јаче спреге
- Проводници један изнад другог (broad-side coupled lines)

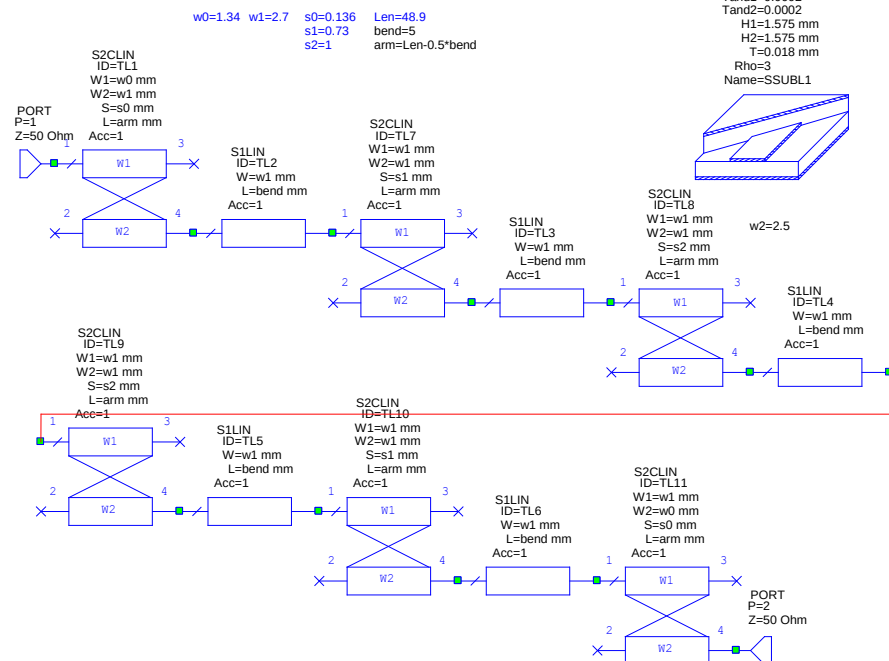
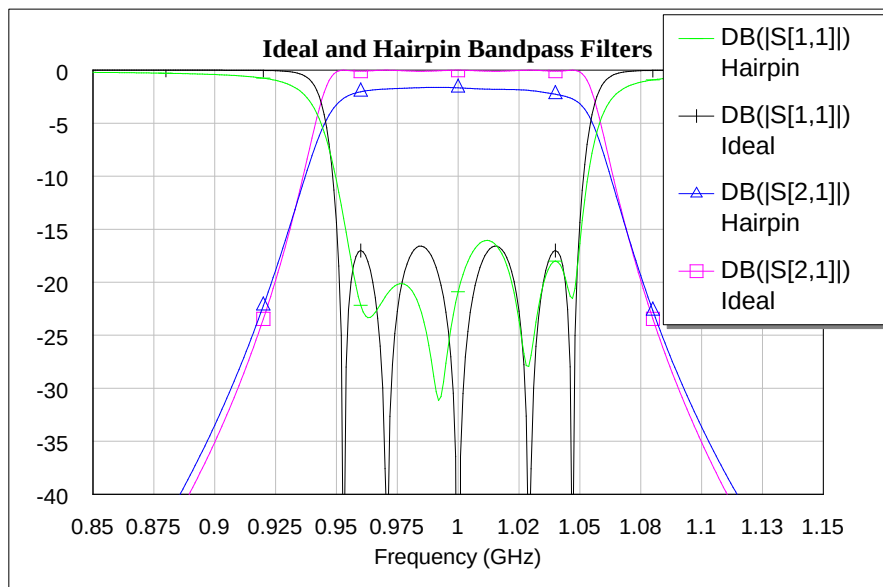
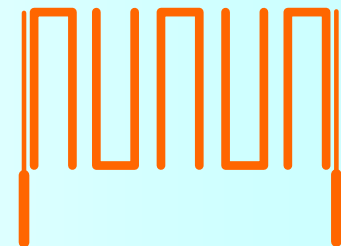


- Резонатори могу бити и кратко спојени, што је за неке примене практичније
- Ови филтри су врло дугачки

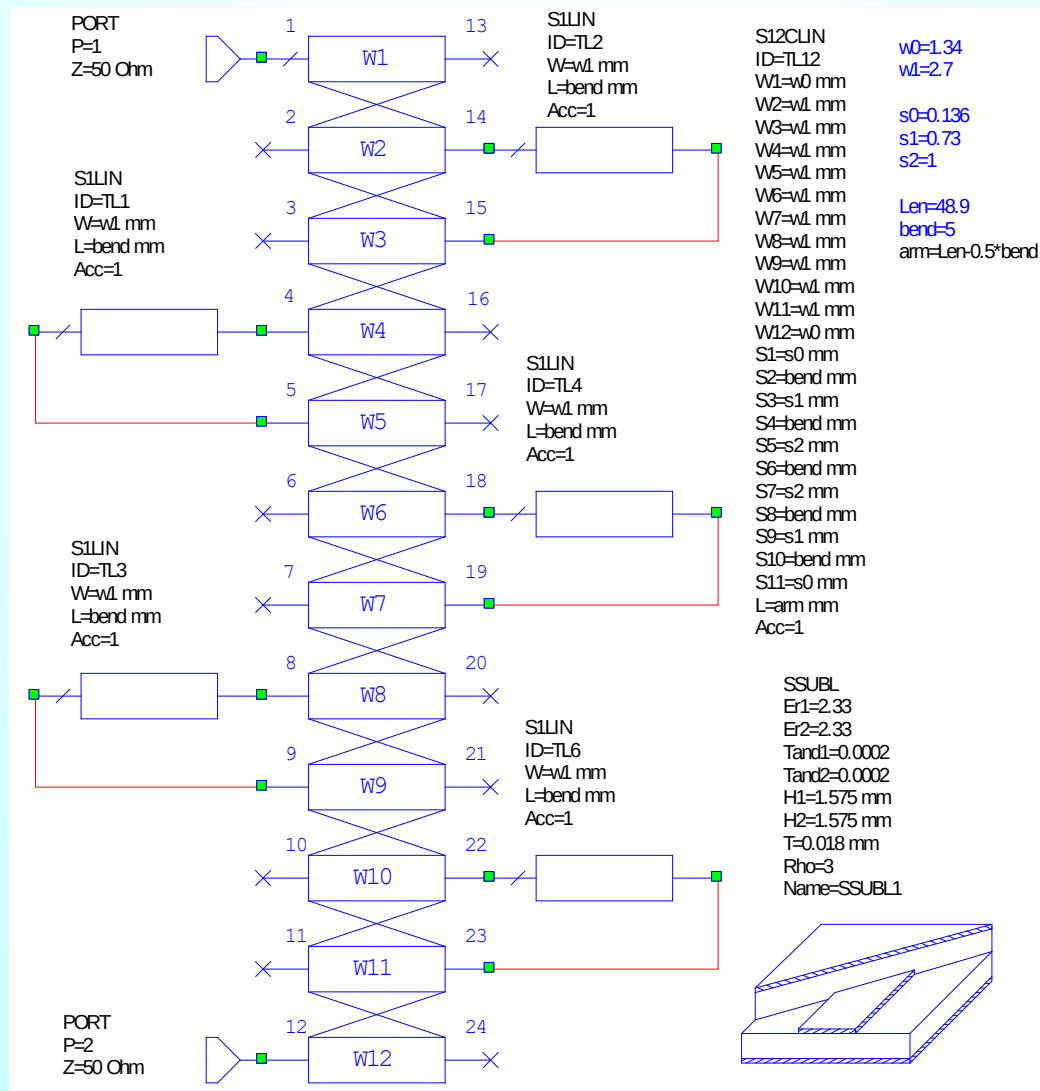


# Филтар са укосницама

- Компактнија варијанта филтра са п.с.п.р.
- Савијање резонатора (hairpin filter)
- Спрега! ( $5h$ )
- Исти пример (у техници тракастих водова)



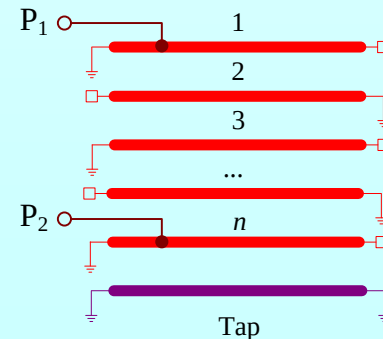
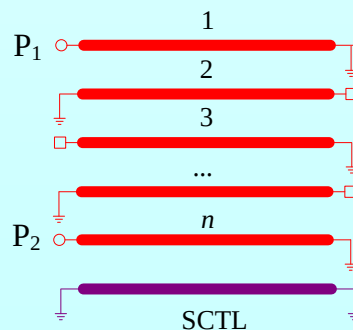
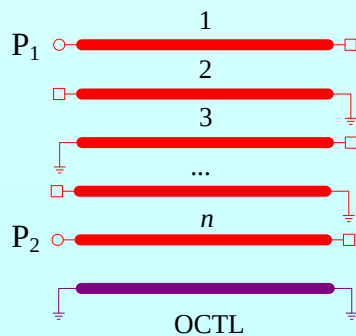
# Филтар са укосницама са урачунатом спрегом





# Интердигитални филтар

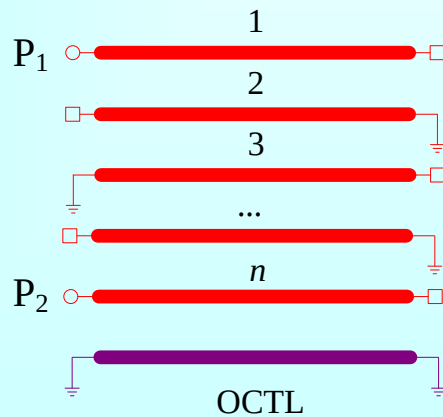
- Пропусник опсега
- Спрегнути четвртталасни резонатори
- Вишепроводнички вод
- Електричне дужине резонатора су (у основној верзији) једнаке
- Компактнији од филтра са п.с.п.р.
- Паразитни пропусни опсези само на непарним умношцима (и у микрострип реализацији!)



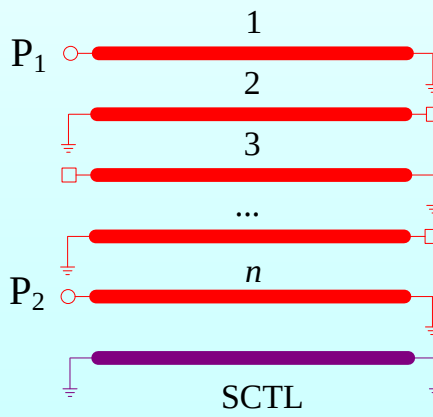


# Интердигитални филтар...

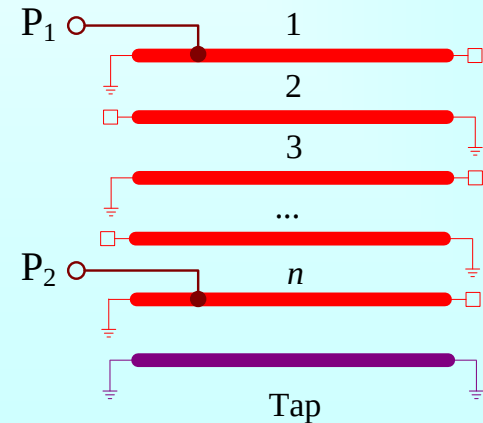
- За штампану технику мана су кратки спојеви
- Спрега са уводницима: преко процепа или кондукциона
- Могу се реализовати и за уске и за широке пропусне опсеге (за разлику од филтара са п.с.п.р.)



Спрега преко процепа



SCTL



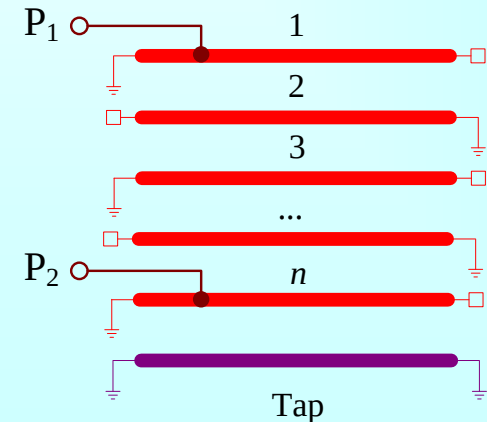
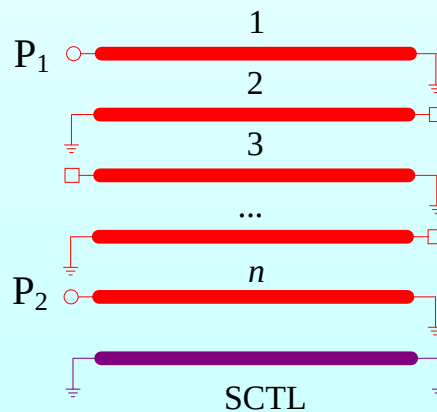
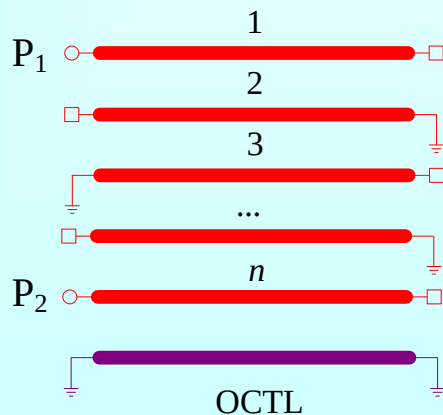
Tap

Кондукциона спрега



# Интердигитални филтар...

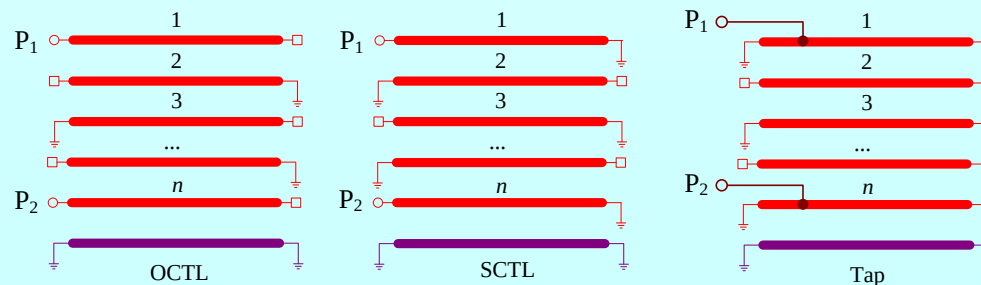
- За ускопојасне филтре, ред филтра је практично једнак  $n-2$
- Ако је пропусни опсег филтра широк уводници имају значајну селективну улогу





# Интердигитални филтар...

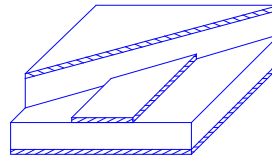
- Синтеза филтра се базира на синтези  $[Y_c]$  или  $[B'] = [Y_c]/c$  вишепроводничког вода
- Спрега између несуседних водова се може занемарити
- Други начин је помоћу софтверских алата:
- Прво се процени ред филтра
- Затим се примењује оптимизација и подешавање симулационог модела



# Интердигитални филтар...

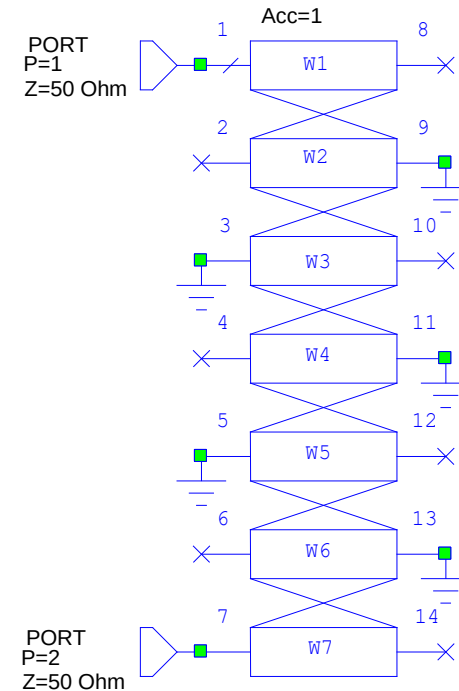
- Пример:  
Чеб., петог реда,  
0,9 - 1,1 GHz,  
 $A_{\varepsilon} = 0,2 \text{ dB}$

SSUBL  
Er1=2.33  
Er2=2.33  
Tand1=0.0002  
Tand2=0.0002  
H1=1.575 mm  
H2=1.575 mm  
T=0.018 mm  
Rho=3  
Name=SSUBL1



S7CLIN  
ID=TL1  
W1=w1 mm  
W2=w2 mm  
W3=w3 mm  
W4=w4 mm  
W5=w3 mm  
W6=w2 mm  
W7=w1 mm  
S1=s1 mm  
S2=s2 mm  
S3=s3 mm  
S4=s3 mm  
S5=s2 mm  
S6=s1 mm  
L=48.8 mm

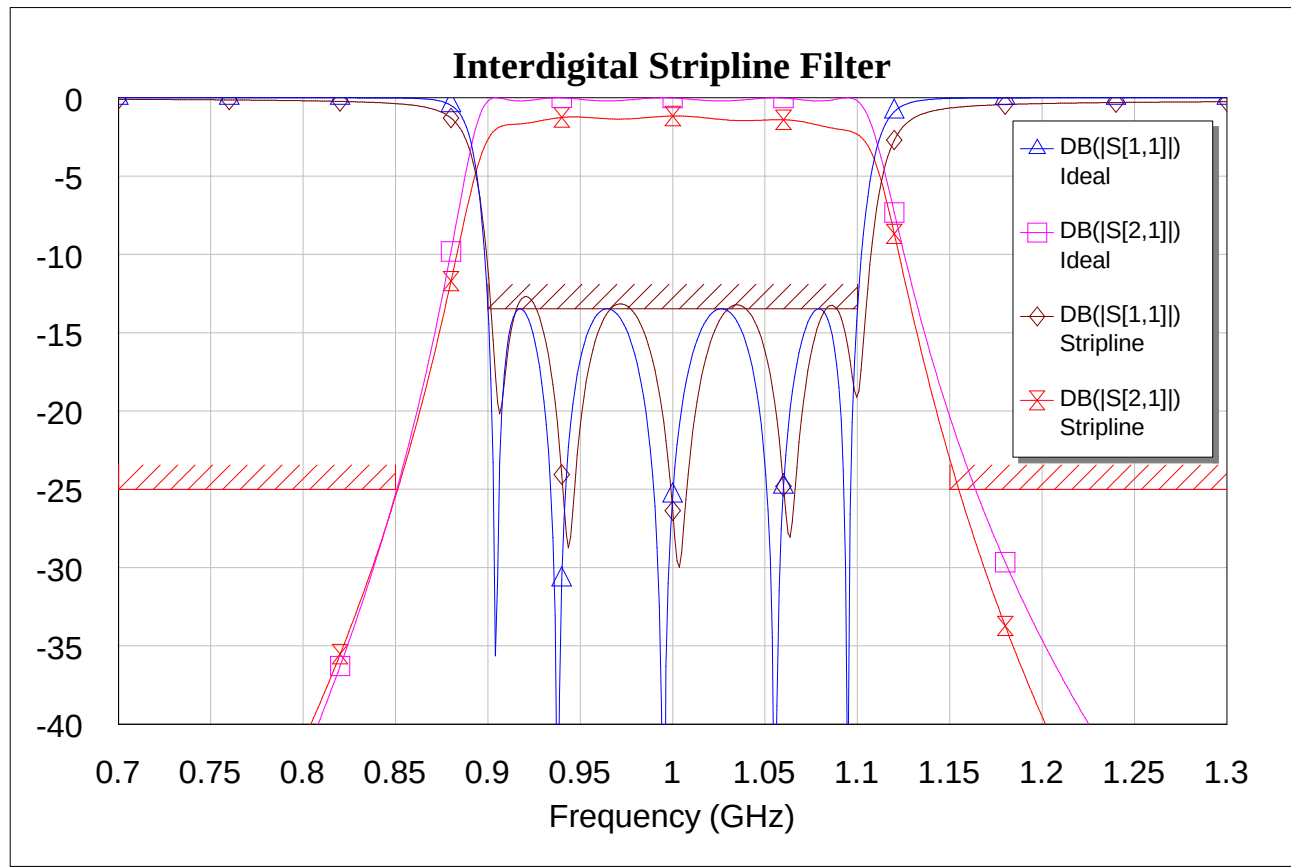
w1=1  
w2=1.538  
w3=1.072  
w4=0.9141  
s1=0.49  
s2=1.24  
s3=1.48





# Интердигитални филтар...

- Резултат оптимизације
- Поређење се идеалним  $LC$  филтром

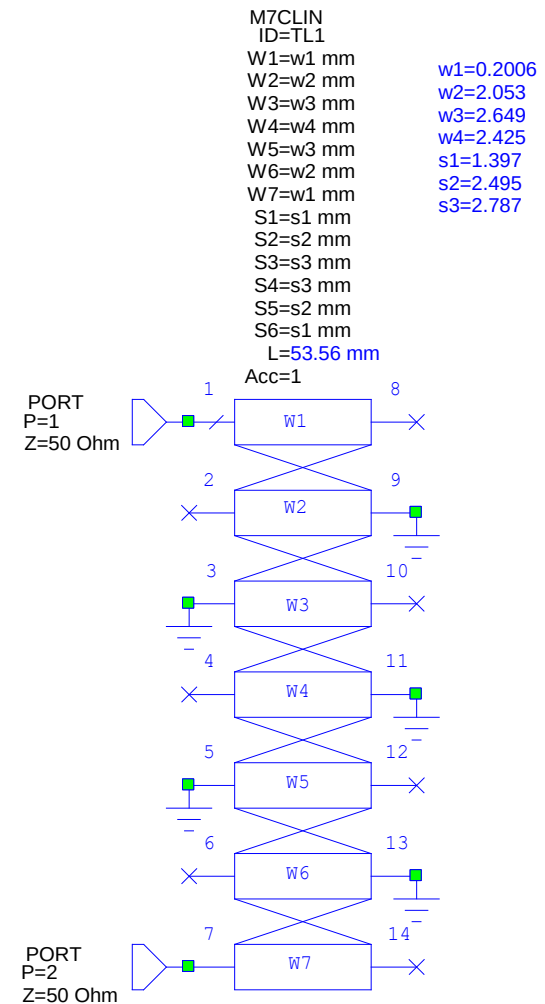
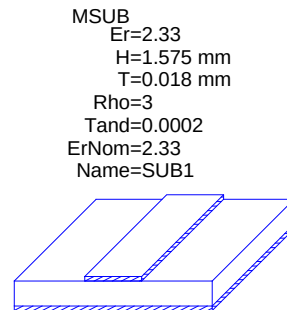
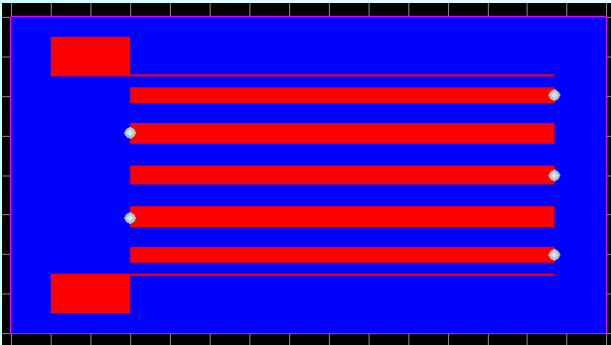






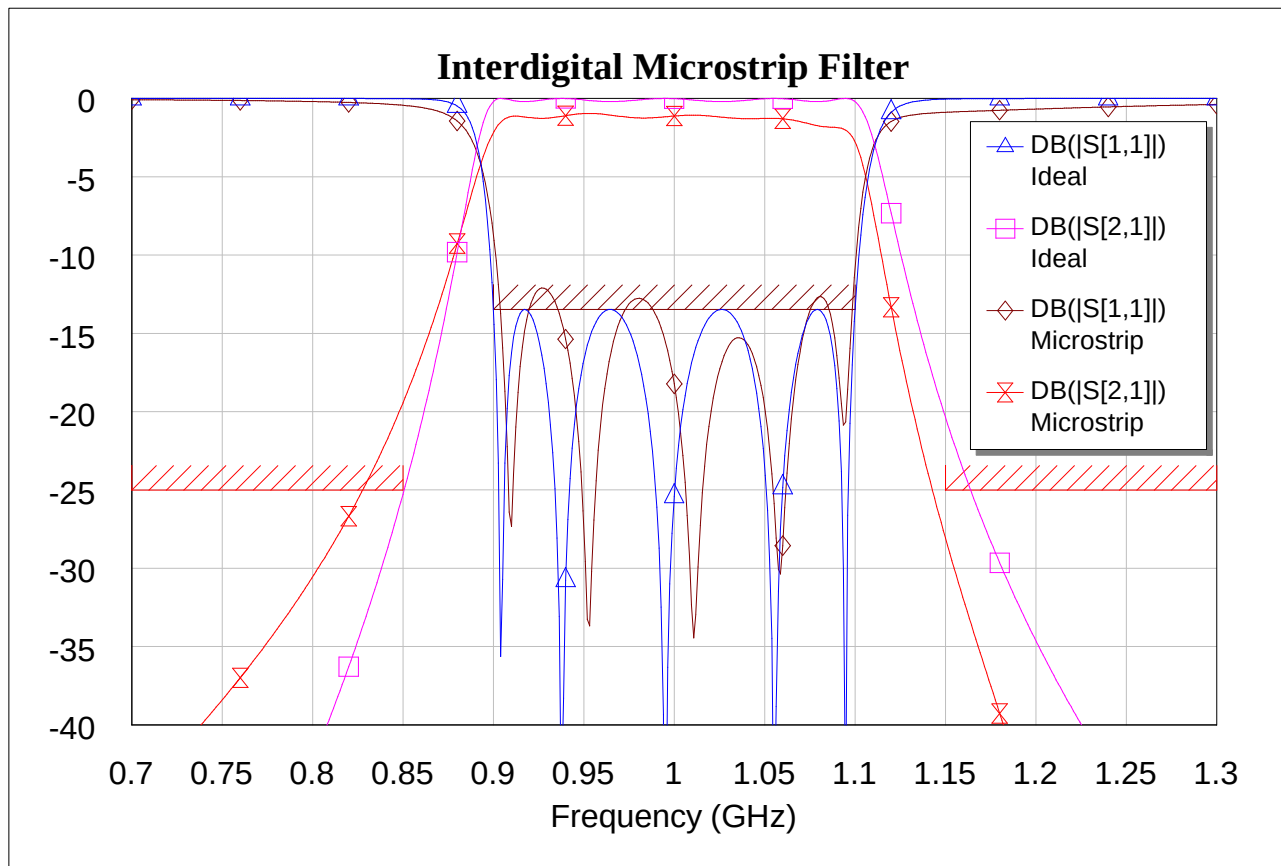
# Интердигитални филтар...

- Исти пример али у микрострип техници



# Интердигитални филтар...

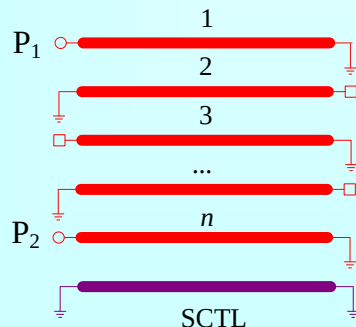
Резултат:



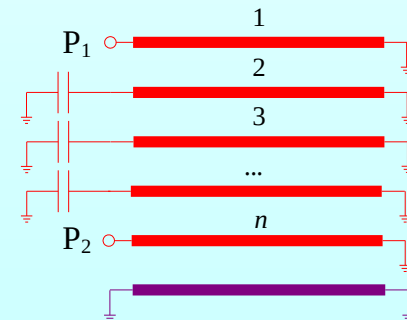


# Чешљасти (comblines) филтар

- Пропусник опсега, од спрегнутих водова
- У односу на интердигитални филтар:
  - Кратки спојеви су са исте стране
  - **Компактнији**: због концентрисаних кондензатора дужине резонатора су мање од  $\lambda/4$  (типично  $\lambda/8$ )
  - За иста растојања између проводника, спреге су веће – **шири пропусни опсези**



Интердигитални филтар

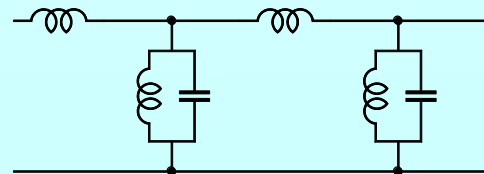
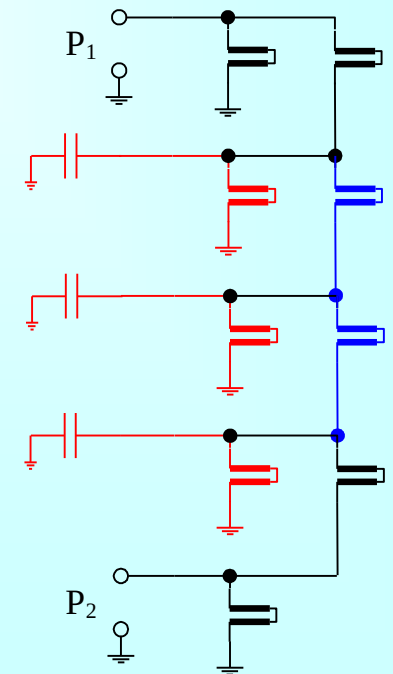
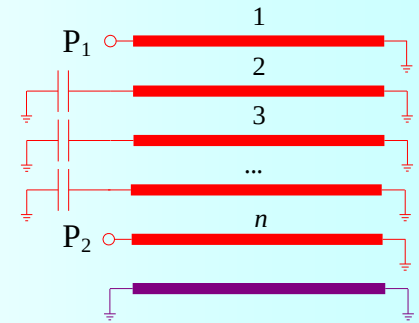


Чешљасти филтар



# Чешљасти филтар...

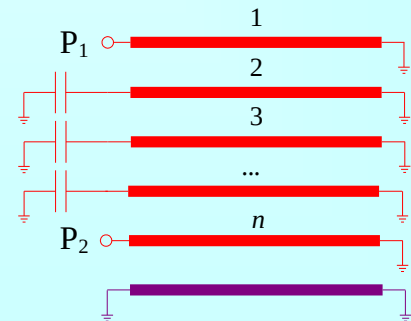
- Ред филтра је практично  $n - 2$
- Први и последњи вод су уводници
- У еквивалентној шеми огранци су исте дужине ( $\lambda/8$  на  $f_0$ )
- Филтар са индуктивно спрегнутим резонаторима
- Паразитне резонанције потиснуте ка вишим учестаностима (пример)





# Чешљасти филтар...

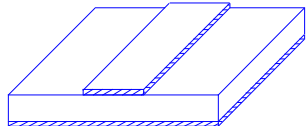
- На учестаности  $2f_0$  ( $D = \lambda/4$ ) огранци имају  $Z_{ul} \rightarrow \infty$ , па је  $s_{21} = 0$ 
  - Десна страна карактеристике је врло стрма
- Због концентрисаних кондензатора може имати добар  $Q$ -фактор и на супстрату са великим  $\text{tg } \delta$  (FR-4)
- Синтеза се заснива на пројектовању вишеспроводничког вода жељених параметара
- Оптимизација
- Слично као код интердигиталног филтра



# Пример анализе



MSUB  
Er=2.33  
H=1.575 mm  
T=0.018 mm  
Rho=3  
Tand=0.0002  
ErNom=2.33  
Name=SUB1

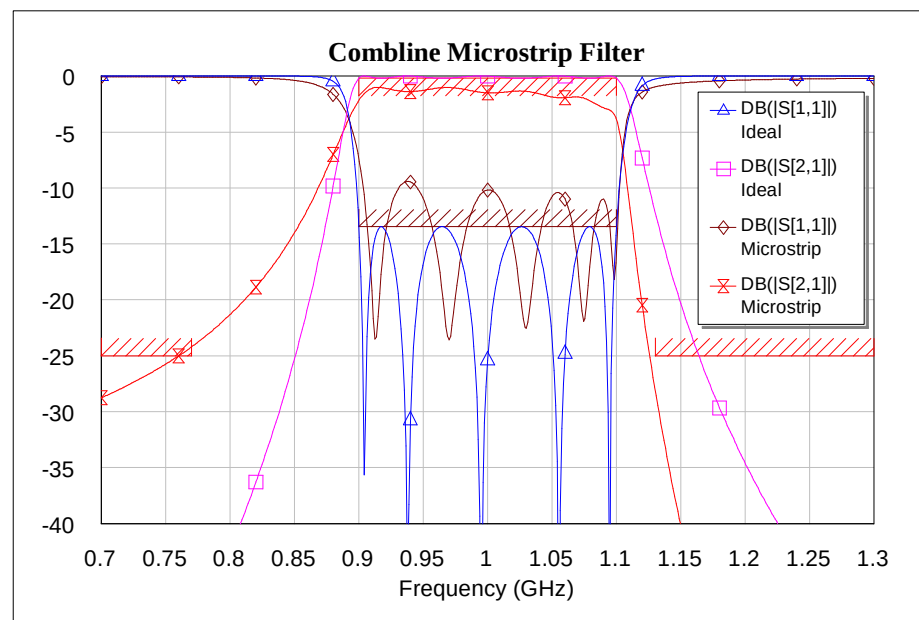
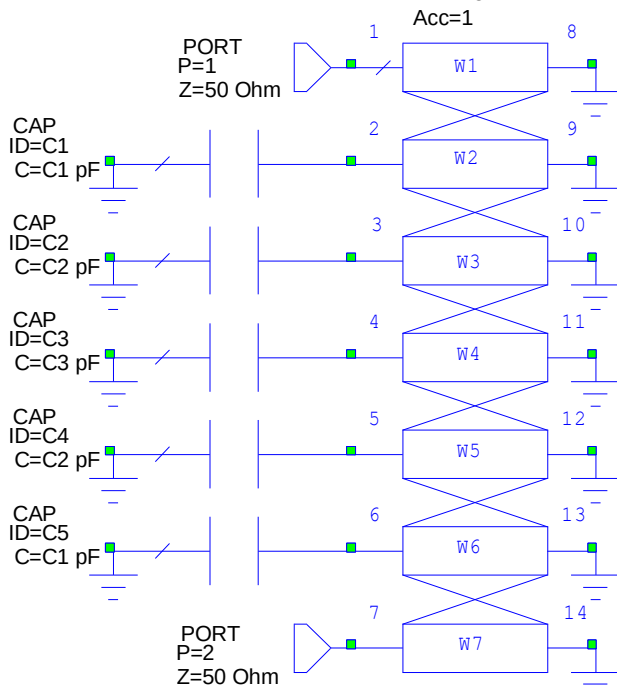


M7CLIN  
ID=TL1

W1=w1 mm  
W2=w2 mm  
W3=w3 mm  
W4=w4 mm  
W5=w3 mm  
W6=w2 mm  
W7=w1 mm  
S1=s1 mm  
S2=s2 mm  
S3=s3 mm  
S4=s3 mm  
S5=s2 mm  
S6=s1 mm  
L=25 mm  
Acc=1

w1=1.06  
w2=1.193  
w3=1.941  
w4=2.035  
s1=0.2  
s2=1.747  
s3=2.38

C1=2.2  
C2=2.2  
C3=2.2

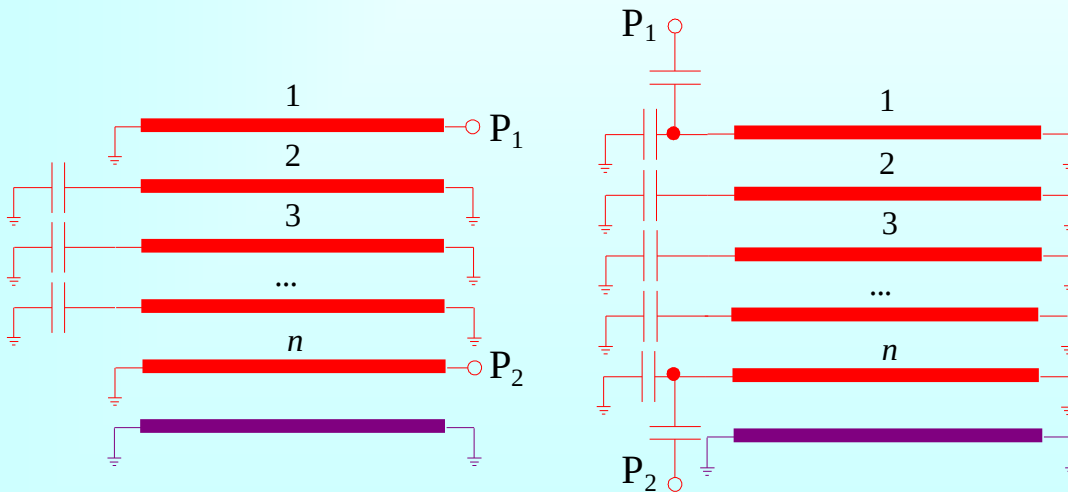
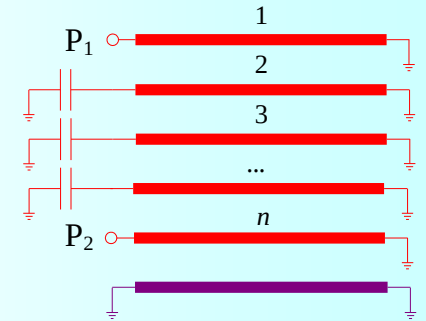


Поређење са идеалним LC филтром

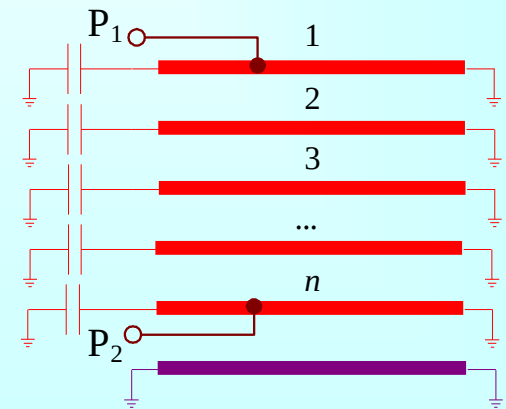


# Спруге приступа чешљастиг филтра

- Додатне могућности оптимизације
- Код кондукционе спруге једноставнија трансформација импеданси

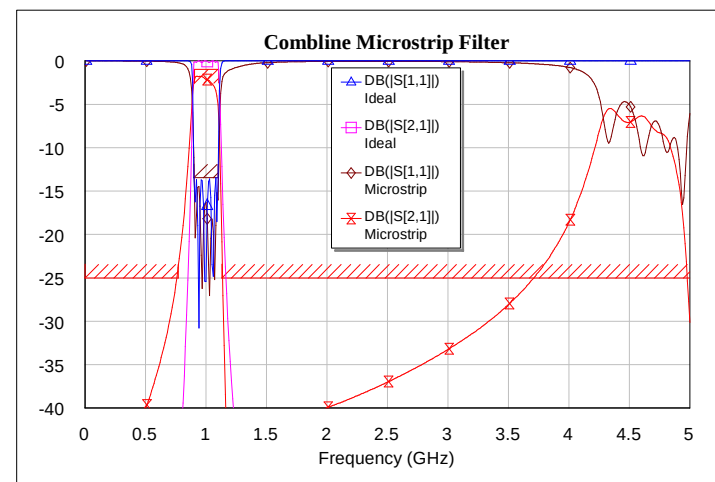
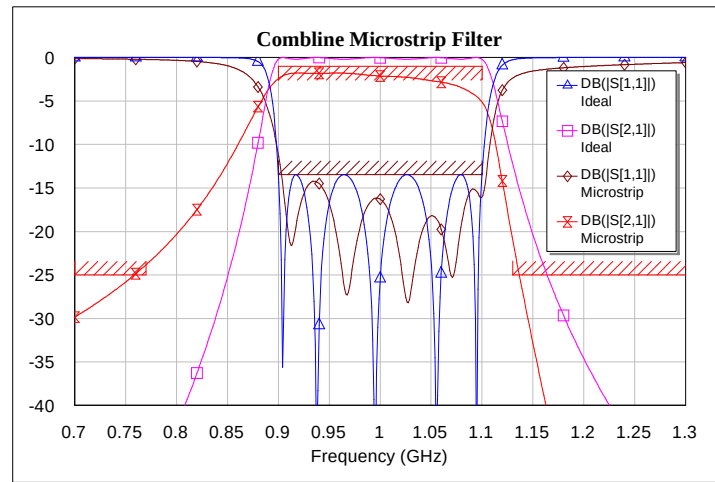
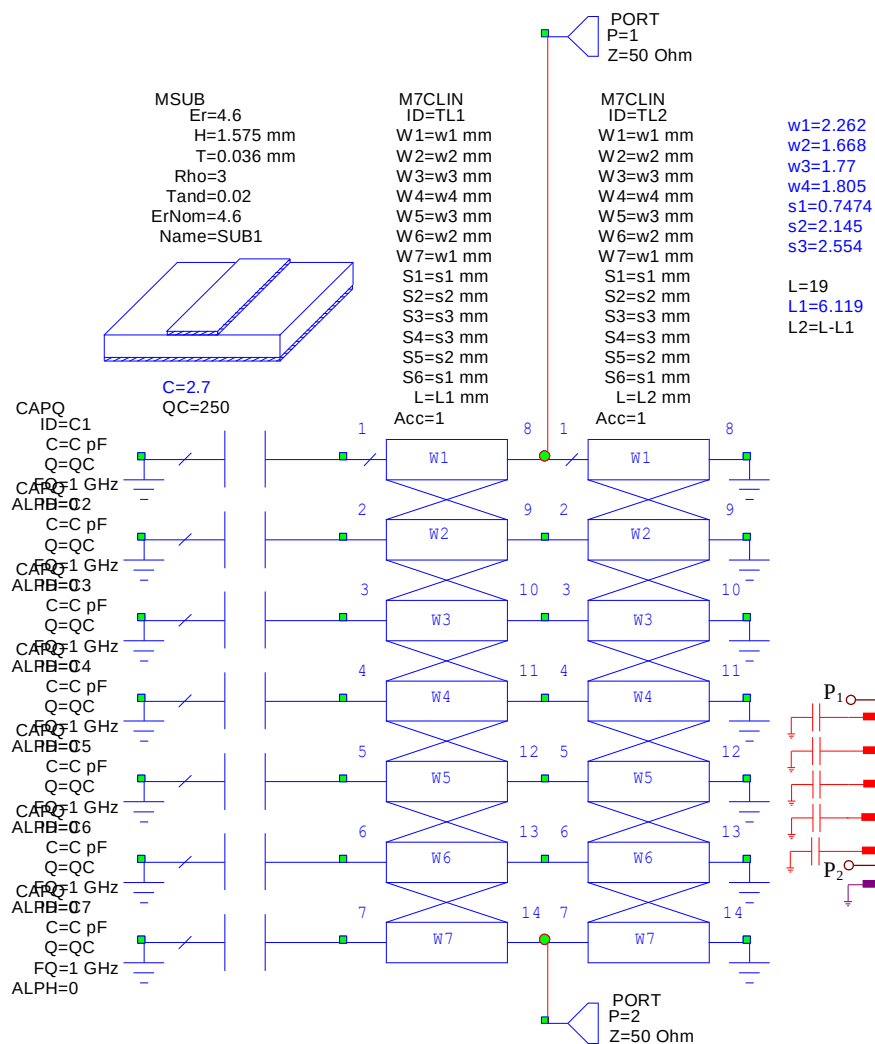


Преко капацитивног разделника



Кондукциона

# Пример кондукционе спреге







# Могуће реализације

- Са променљивим кондензаторима
- Са варактор диодама – промена централне учестаности и до једне октаве (1:2)
- У виду механичких конструкција, са правоугаоним или округлим водовима
- У керамичком блоку велике пермитивности (баријум-титанат), техником сито-штампе